

微铣削毛刺研究进展

吴宇锋, 廖建

重庆大学

摘要: 介绍了微铣削毛刺试验、毛刺尺寸模型、毛刺仿真模拟及去毛刺工艺的最新研究进展, 并对目前研究不足进行了总结, 指出了今后的重点研究方向。

关键词: 微铣削毛刺; 尺寸模型; 仿真模拟; 去毛刺

中图分类号: TG547; TH161

文献标志码: A

Research Progress of Micromilling Burr

Wu Yufeng, Liao Jian

Abstract: The latest progress of the experiment and the dimension model of micromilling burr, the FE model of the burr as well as the deburring are concluded in this paper. Summarizing the deficiencies of current research and pointing out the key research direction in the future.

Keywords: micromilling burr; dimension model; FE model; deburring

1 引言

过去的二十年, 航空航天、精密仪器、生物医学等领域对微小型产品的需求日益增加, 对微小型产品的质量要求也越来越高, 原有微加工技术已无法满足现代工业要求。微铣削加工作为微加工领域最具代表性的技术之一, 其加工效率是电火花加工(EDM)的5倍, 同时仍保持相当的加工精度^[1], 在微小型产品加工领域内具有广阔的应用前景, 越来越多科研人员开始着重于提高微铣削质量的研究。

微铣削毛刺作为微铣削过程中严重影响零件表面质量的缺陷之一, 其生成部位遍布工件各个部位, 如材料切入切出口、侧边、顶部及底部等。受尺寸效应、最小切削层厚度、刀具刚度不足、偏心等因素影响, 微铣削毛刺生成机理与传统铣削有很大不同, 其相对尺寸与传统铣削相比大得多, 而加工区域尺寸微小也给去毛刺带来非常大的困难, 因此微铣削毛刺值得深入研究。

2 微铣削毛刺试验

微铣削毛刺尺寸受众多因素影响, 试验主要集中于切削参数、刀具几何角度、振动及涂层、润滑条件等对毛刺影响的研究, 也有少量学者采用其他方法控制毛刺, 如液氮冷冻、激光预热等。研究材料范围涵盖了钛合金、铝合金、镍基合金、钢和铜等应用最为广泛的金属, 亦有少量非金属材料毛刺的研究。

2.1 切削参数对毛刺影响

切削参数对毛刺的影响最为直接。切削参数包括主轴转速(或切削速度)、进给速度(或每齿进给量)、铣削深度(或背吃刀量)等。Vipindas K. 等^[2]进行了Ti6Al4V合金的微铣削全因子试验和方差分析, 以研究主轴转速、进给速度和切削深度及其交互作用对顶部毛刺宽度的影响, 研究发现逆铣边毛刺尺寸小于顺铣边, 当铣刀直径为0.5mm时, 进给速度、铣削深度、主轴转速—进给速度、进给速度—切削深度交互作用对顶部毛刺宽度影响显著; 当铣刀直径为1mm时, 主轴转速、进给速度、铣削深度、进给速度—铣削深度交互作用对顶部毛刺宽度影响显著。Teng W. 等^[3]基于正交试验分析了Ti6Al4V合金超高速微铣削过程中主轴转速、铣削深度及进给速度对毛刺尺寸的影响, 在一定范围内毛刺尺寸受主轴转速影响不明显, 随着切削深度的减小及进给速度的增加而减小。张志阳等^[4]基于Al6061-T6铝合金微铣削试验揭示了铣削速度、进给速度、轴向铣削深度及切削刃刃口半径对毛刺尺寸的影响规律, 并借助统计方法系统地研究了这些参数对毛刺影响的主次顺序, 研究表明, 逆铣边毛刺小于顺铣边毛刺, 每齿进给量对毛刺影响最大, 刃口半径及轴向铣削深度次之, 刃口半径—主轴转速的交互作用对毛刺尺寸影响最小, 最终通过参数优化得到了使毛刺最小的参数组合。袁美霞等^[5]利用单因素法研究了切削参数及刀具磨损对Al6061铝合金微铣削毛刺生成的影响, 试验表明, 当切削深度增加, 毛刺由长条须状变为锯齿状, 随着刀具磨损, 铣削加工不再

稳定使得形成的毛刺忽大忽小。Kiswanto G. 等^[6]对 1100 铝合金微铣削过程中顶部毛刺、入口毛刺、底部毛刺及出口毛刺进行了全面研究,结果表明,顶部毛刺主要出现在顺铣边,顶部毛刺与主轴转速、进给速度和切削深度无明显关系,入口毛刺与刀具磨损有关,顺铣边和逆铣边均出现底部毛刺,且随着刀具磨损底部毛刺从无到有,直至尺寸超过顶部毛刺,出口毛刺主要出现在出口侧边,其尺寸与形状不受顺逆铣方式影响。Zhao Kai 等^[7]对薄铜层进行微铣削研究发现,毛刺尺寸受轴向铣削深度影响不明显,但随着进给速度和切削速度的增加而增加。孙树峰等^[8]基于灰色关联度分析法研究了对合金钢微铣削毛刺影响的最大因素,分析表明,关联度最大的前三个因素为:进给量过大,背吃刀量过大,主轴转速过小;通过试验验证了该方法的有效性,为毛刺预测和控制提供了一种有效途径。Ervin P. 等^[9]研究了医用高分子材料在微铣削过程中的毛刺,结果显示主轴转速和进给速度对毛刺尺寸影响较大。当进给速度较高时,由于材料模量较低,切屑并未完全脱离工件而是发生扭曲变形,从而形成毛刺。文献[10]将双相钢(铁素体、珠光体)进行晶粒细化得到各向同性单相超细晶粒钢(铁素体),并利用微铣削试验比较了两种钢毛刺的异同,试验发现同等条件下两种钢的毛刺尺寸横向对比并无明显差异,毛刺尺寸与每齿进给量成反比,刀具切进及切出阶段毛刺尺寸最大,并详细分析了刀具切进切出阶段毛刺的形成机理。Shelton J. A. 等^[11]采用激光辅助微铣削(LAMM)对 316SS 钢、422SS 钢及 Ti-64 合金进行了加工,材料之间横向对比表明边缘毛刺尺寸与材料种类关系不大,但都随着轴向铣削深度增加而增大。

2.2 刀具对毛刺影响

刀具角度、涂层、磨损、刀具偏心 and 振动以及因积屑瘤引起的刀具角度改变都归为刀具对毛刺影响的研究。Saptaji K. 等^[12]对比了直径 0.8mm、不同锥角的微铣刀加工 Al6061 铝合金得到毛刺的差异,试验结果表明,随着铣刀锥角增加,微槽顶部毛刺减小,槽侧壁表面质量明显提升,当锥角增大至 50°时,微槽顶部毛刺很小,侧壁光滑,因此他预测当铣削参数进一步优化后可以使毛刺基本消失。刀具角度对毛刺尺寸的影响见图 1。

Ucun I. 等^[13]对比了有无涂层铣刀加工 718 合金钢所得到的微槽质量,结果表明,随着铣削长度增加,涂层铣刀毛刺尺寸基本不变;因为刀具磨损,无涂层铣刀在加工长度超过 60mm 以后毛刺尺寸明显

增加,分析认为主要是刃口半径增大导致了犁耕作用。卢晓红等^[14]采用 300 μm 的双刃硬质合金刀具进行镍基高温合金 Inconel718 微铣削试验,利用单因素法研究了刀具磨损与毛刺尺寸的关系,发现该材料微铣削毛刺与传统铣削及其他材料微铣削毛刺有很大不同,鳞状毛刺出现在槽的一侧边界,另一侧比较平整,分析认为该毛刺是由于刀具磨损导致切屑未完全从第一变形区分离,而是残留在加工表面上,之后的刀齿对其进行推挤,层层累积从而形成鳞状毛刺,这与文献[9]的研究结果类似。Wu X. 等^[15]研究了刀具刃口半径及未切削层厚度对无氧铜微铣削过程中顶部毛刺的影响,毛刺的高度随着刃口半径增加而增加,当未切削层厚度等于刃口半径时,毛刺尺寸最小,进一步减小切削层厚度时毛刺反而增大。为了研究刀具振动与偏心与毛刺形成的关系,Liu H. 等^[16]进行了 TC4 钛合金的微铣削试验,研究了铣刀主轴与旋转主轴存在偏心情况下材料毛刺形成的规律,发现每齿进给量对毛刺影响显著,刀具切入处毛刺尺寸和数量小于切出处。文献[17]对 Ti6Al4V 合金进行了微铣削试验以研究积屑瘤对铣削质量的影响,发现积屑瘤与毛刺尺寸并无明显关系,但是毛刺高度随着切削深度的增大而增大。

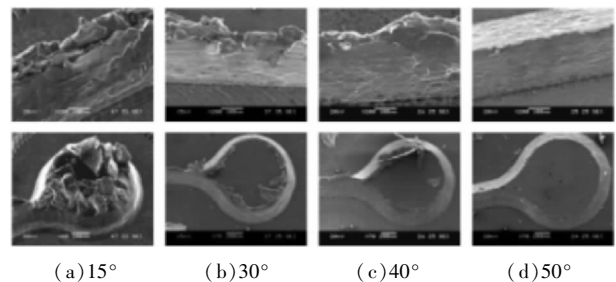


图 1 不同锥角刀具铣削得到的顶部及侧边毛刺

2.3 润滑条件对毛刺影响

润滑条件与毛刺之间关系,尤其是与最小量润滑(MQL)有关的研究文献并不多。Hassanpour H. 等^[18]将毛刺尺寸作为微槽表面质量评定标准之一,研究了最小量润滑条件下 Ti6Al4V 合金微铣削加工质量,试验结果显示毛刺尺寸随着主轴转速和每齿进给量增加而减小,铣削深度则对其影响不大。Ucun I. 等^[19]对镍基合金 Inconel718 进行了微铣削试验,分别对干铣、最小量润滑及液氮低温预冷条件下材料的毛刺进行了研究。试验结果表明,在干铣和最小量润滑条件下毛刺并无明显区别,但干铣会加剧刀具磨损,从而间接增大毛刺尺寸,在低温预冷条件下,材料的韧性降低,硬度增大,从而使材料毛

刺显著减小。Supekar S. D. 等^[20]验证了用超临界流体二氧化碳(scCO₂)作为切削液来改善材料加工性能的可行性,并在304不锈钢和铜的微铣削试验中发现,使用scCO₂作为切削液的材料,总体上毛刺尺寸小于干铣削条件下材料的毛刺,两者相互作用的原因有待进一步深入研究。

3 微铣削毛刺尺寸模型

微铣削毛刺尺寸模型主要分为两类:一类从毛刺生成机理入手,基于毛刺由切屑转化过程的连续性,假设生成毛刺所需功与切屑形成所需功相等,建立毛刺尺寸模型;另一类以统计学为基础,在大量试验数据支撑下得出毛刺尺寸的经验模型。

Cheng Jun 等^[21]研究了Ti6Al4V合金的微铣削顶部毛刺成形机理,建立了吃刀抗力 F_p 所做的功与顶部毛刺尺寸关系的数学模型,通过该模型分析发现顺铣边 F_p 所做的功多于逆铣边,因此顺铣边的毛刺尺寸大于逆铣边的毛刺尺寸。Özel T. 等^[22]及Kumar P. 等^[23]在文献[24-26]的研究基础上分别建立了顶部毛刺高度及厚度模型。模型分别表示为

$$H_{bl} = \frac{a_p(1+\nu)e^{-3\phi_a}}{\sqrt{3}E} \left(\frac{\sin\phi_s}{2\sqrt{3}\cos\phi_a + 2\sin\phi_s} \right) \quad (1)$$

$$W_{bl} = r_\beta (e^{-3\phi_a} \sqrt{\cos\phi_a} - 1) \quad (2)$$

$$H_{b2} = \left[t_x \theta - \frac{Nt_x^2 \theta}{2\pi R + Nt_x} + R - \sqrt{R^2 - \left(\frac{2\pi R t_x}{2\pi R + Nt_x} \right)^2} - \frac{1}{\log\left(\tan\frac{\beta_0}{2}\right)} R\theta \right] \cos\beta_0 \quad (3)$$

$$\phi_a = -\sin\left(\frac{\sqrt{3}P_0}{2\sigma_p}\right) + \frac{\pi}{6} \quad (4)$$

式中, H_{bl} 、 W_{bl} 为uğrul Özel^[22]所建毛刺高度和宽度模型; H_{b2} 为TPankaj Kumar^[23]所建毛刺高度模型; a_p 为背吃刀量; ν 为泊松比; E 为杨氏模量; r_β 为有效刃口半径; ϕ_a 为可塑性椭圆角,可由式(4)得出; t_x 为每齿进给量; θ 为铣刀转角; N 为铣刀齿数; R 为铣刀刀齿半径; β_0 为初始负剪切角,其值为20°; P_0 、 σ_p 、 ϕ_a 分别为刀尖压力、塑性应力和剪切角。

试验表明,uğrul Özel的模型与试验结果吻合良好,Pankaj Kumar的模型则表明在其他参数已知为定值时,毛刺高度只与铣刀旋转角度有关,该模型毛刺的预测高度和试验高度误差最大为7%。Zhao Kai 等^[8]在微铣削薄铜覆盖的塑料板时,考虑切削速度和进给速度对毛刺宽度的影响,基于统计方法建立了毛刺宽度的经验模型,即

$$W_{b2} = a + bv_c + f_d + dv_c^2 + ef_d^2 + f_v f_d \quad (5)$$

式中, W_{b2} 为毛刺宽度; v_c 为刀具切削速度; f_d 为进给速度; a 、 b 、 c 、 d 、 e 、 f 为常数,由试验数据拟合所得,实际测得的毛刺高度在10 μ m-50 μ m之间,模型预测的平均误差为2 μ m。

Yang C. 等^[27]基于能量守恒原理推导出了Al2124铝合金微铣削过程中刀具切出方向的毛刺高度模型,模型与试验结果误差很小。Piquard R. 等^[28]考虑了铣削用量、顺逆铣方式、合金材料的高、低水平及其交互作用对毛刺尺寸的影响,建立了镍钛合金毛刺尺寸响应面模型,即

$$Y = M + \sum_i [E_{i-} \ E_{i+}] [I] + \sum_{i,j} [I] \begin{bmatrix} E_{i-j-} & E_{i-j+} \\ E_{i+j-} & E_{i+j+} \end{bmatrix} [J] + \sum_{i,j,k} \begin{bmatrix} [I] \begin{bmatrix} E_{i-j-k-} & E_{i-j+k-} \\ E_{i+j-k-} & E_{i+j+k-} \end{bmatrix} \\ \times [J] [I] \begin{bmatrix} E_{i-j-k+} & E_{i-j+k+} \\ E_{i+j-k+} & E_{i+j+k+} \end{bmatrix} [J] \end{bmatrix} \times [K] \quad (6)$$

式中, Y 为响应量; M 为毛刺平均尺寸;[I]、[J]、[K]为代表不同参数的向量,当参数为低水平时为[1 0]^t,参数为高水平时对应[0 1]^t; E_i 代表 I 参数对毛刺尺寸的影响,正、负号分别对应参数高、低水平; $E_{i,j}$ 及 $E_{i,j,k}$ 为参数间的交互作用对毛刺尺寸的影响。

4 微铣削毛刺仿真模拟

大量对毛刺形成机理的研究主要以试验为主,然而试验有其本身的局限性,无法直观动态观察毛刺生成过程等,有限元技术的成熟正好能弥补这一缺陷。基于有限元软件对毛刺形成机理及毛刺尺寸的研究正成为研究热点。

Özel T. 等^[22]对Ti6Al4V合金微铣削切屑和毛刺形成过程进行了模拟仿真,发现随着刀具磨损,切削刃刃口半径增大使顶部毛刺显著增加,且顺铣边的毛刺尺寸大于逆铣边的毛刺。Yadav A. K. 等^[29]利用John-Cook本构模型研究了Ti6Al4V合金高速铣削时切削速度对毛刺尺寸的影响,仿真结果如图2所示。结果表明,当切削速度由100000r/min增加至200000r/min时,毛刺尺寸减小96%,进一步的试验表明,模拟结果的最大误差为15%。Chen M. J. 等^[30]利用DEFORM-3D有限元软件研究球头铣刀微铣削Ti6Al4V合金过程中的顶部毛刺、进出口毛刺及槽底毛刺,仿真结果显示,轴向铣削深度与刃口半径比显著影响顶部毛刺尺寸,切削速度及刃口磨损是槽底侧面毛刺形成的重要原因。K. Yang 等^[31]模拟了2024-T6铝合金微铣削毛刺形成的动

态过程,仿真结果显示随着每齿进给量、背吃刀量及刃口半径增加,毛刺尺寸增大,其中刃口半径和最大有效应力是影响微铣削毛刺尺寸的主要因素。

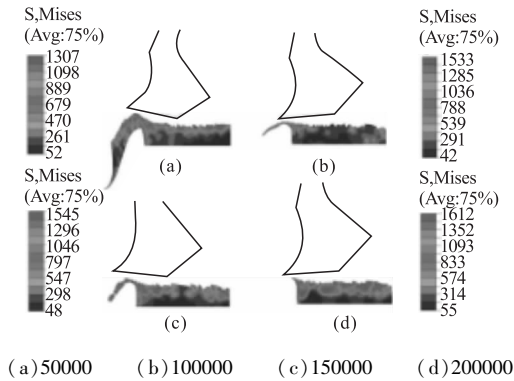


图2 不同切削速度下的毛刺尺寸
(切削深度 $10\mu\text{m}$ 、刀具半径 0.5mm)

5 微铣削毛刺控制及去除

微小型工件尺寸为毫米级,特征尺寸为微米级,因此与传统铣削毛刺相比,微铣削毛刺去除更为困难。Cheng Jun 等^[21]研究了一种将工件表面涂上环氧树脂层然后再加工工件的方法,该方法能大幅减小顶部毛刺,试验表明新方法在每齿进给量大于最小切削层厚度后基本可以抑制顶部毛刺形成,方法如图3所示。

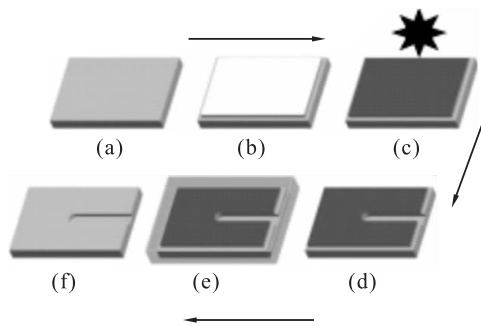


图3 加工步骤

类似地,Teng W. 等^[3]采用熔点为 70°C 的合金作为支撑材料涂覆于钛合金表面,并同时优化主轴转速、切削深度及进给速度,加工出的钛合金微金字塔结构基本未产生毛刺。Liu H. 等^[16]推荐在TC4钛合金铣削时采用不易与合金发生粘结的刀具并减小每齿进给量以控制毛刺形成。Vipindas K. 等^[2]及张志阳等^[4]提出了一种只用逆铣边加工微槽的方法,试验表明,该方法能显著减小毛刺尺寸。Shelton J. A. 等^[11]的研究表明,在合适的工艺参数下,激光辅助微铣削几乎能完全去除不锈钢毛刺。

6 结语

有关微铣削毛刺的研究仍处于初级阶段,研究成果偏少。由上文分析可以看出,目前的研究主要以试验为主,有限元仿真研究相对较少。仿真主要集中在以Ti6Al4V合金为主的合金上,而对其他应用广泛的金属及非金属材料的毛刺形成机理研究较少。另外,对毛刺形成影响因素的研究主要集中在切削参数上,而对刀具角度、刀具涂层、润滑条件及去毛刺方法的研究相对较少。已有的模型种类过于单一,目前毛刺尺寸的解析模型主要是以Ko S. L. 等^[24]和Dornfeld D. A. 等^[25]提出的模型为母模型,其模型形式较为复杂,需要进一步提出更丰富和简单的母模型,这些领域将是未来微铣削毛刺的研究重点。

参考文献

- [1] Boswell B, Islam M N, Davies I J. A review of micro-mechanical cutting[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017(1): 1-18.
- [2] Vipindas K, Kuriachen B, Mathew Jose. Investigations into the effect of process parameters on surface roughness and burr formation during micro end milling of Ti-6Al-4V[J]. Advanced Manufacturing Technology, 2016(2): 1-16.
- [3] Teng W, Yi W, Zhaojun K, et al. Micromilling of pyramid structured surface for implant application[J]. Transactions Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2017, 34(4): 357-362.
- [4] 张志阳,裴宏杰,沈春根,等. Al7075铝合金微细铣削毛刺形成及控制技术[J]. 工具技术, 2017, 51(11): 21-25.
- [5] 袁美霞,刘少楠,唐伯雁,等. 微细铣削铝合金6061表面毛刺研究[J]. 表面技术, 2017, 46(8): 268-273.
- [6] Kiswanto G, Zariatin D L, Ko T J. The effect of spindle speed, feed-rate and machining time to the surface roughness and burr formation of aluminum alloy 1100 in micro milling operation[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2014, 16: 435-450.
- [7] Zhao Kai, Jia Zhenyuan, Liu Wei, et al. Burr control for removal of metal coating from plastics substrate by micro-milling[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2016, 31(5): 641-647.
- [8] 孙树峰,章钦栋,黄克,等. 基于灰色关联度分析法的微铣削毛刺研究[J]. 中国机械工程, 2015, 26(15): 2036-2040.
- [9] Ervine P, O'Donnell G E, Walsh B. Fundamental investigations into burr formation and damage mechanisms in the

- micromilling of a biomedical grade polymer[J]. *Machining Science and Technology*, 2015, 19(1): 112 – 133.
- [10] De Assis C L F, Jasinevicius R G, Rodrigues A R. Micro end-milling of channels using ultrafine-grained low-carbon-steel[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 77(5 – 8): 1155 – 1165.
- [11] Shelton J A, Shin Y C. Experimental evaluation of laser-assisted micromilling in aslotting configuration[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2010, 132(2): 237 – 247.
- [12] Saptaji K, Subbiah S. Burr reduction of micro-milled microfluidic channels mould using a tapered tool[J]. *Procedia Engineering*, 2017, 184: 137 – 144.
- [13] Uçun I, Aslantaş K, Bedir F. The performance of DLC-coated and uncoated ultrafine carbide tools in micromilling of Inconel 718[J]. *Precision Engineering*, 2015, 41: 135 – 144.
- [14] 卢晓红, 武文毅, 王文韬, 等. 镍基高温合金 Inconel718 微铣削毛刺试验研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2015(1): 1 – 3.
- [15] Wu X, Li L, He N. Investigation on the burr formation mechanism in microcutting[J]. *Precision Engineering*, 2017, 47: 191 – 196.
- [16] Liu H, Sun Y, Geng Y, et al. Experimental research of milling force and surface quality for TC4 titanium alloy of micromilling[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 79(1 – 4): 705 – 716.
- [17] Oliaei S N B, Karpat Y. Built-up edge effects on process outputs of titanium alloy micromilling[J]. *Precision Engineering*, 2017, 49: 305 – 315.
- [18] Hassanpour H, Sadeghi M H, Rezaei H, et al. Experimental study of cutting force, microhardness, surface roughness, and burr size on micromilling of Ti6Al4V in minimum quantity lubrication[J]. *Material and Manufacturing Processes*, 2016, 31(13): 1654 – 1662.
- [19] Uçun I, Aslantaş K, Bedir F. The effect of minimum quantity lubrication and cryogenic precooling on cutting performance in the micromilling of Inconel 718[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2015, 229(12): 2134 – 2143.
- [20] Supekar S D, Gozen B A, Bediz B, et al. Feasibility of supercritical carbon dioxide based metalworking fluids in micromilling[J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2013, 135(2): 24 – 50.
- [21] Cheng Jun, Jin Yang, Wu Jun, et al. Experimental study on a novel minimization method of top burr formation in micro end milling of Ti – 6Al – 4V[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, 86: 2197 – 2217.
- [22] Özel T, Olleak A, Thepsonthi T. Micromilling of titanium alloy Ti – 6Al – 4V; 3D finite element modeling for prediction of chip flow and burr formation[J]. *Production Engineering*, 2017, 11(4 – 5): 435 – 444.
- [23] Kumar P, Bajpai V, Singh R. Burr height prediction of Ti6Al4V in high speed micromilling by mathematical modeling[J]. *Manufacturing Letters*, 2017(11): 12 – 16.
- [24] Ko S L, Dornfeld D A. A study on burr formation mechanism[J]. *Journal of Engineering Materials and Technology*, 1991, 113(1): 75 – 87.
- [25] Sung-Lim K, Dornfeld D A. Analysis of fracture in burr formation at the exit stage of metal cutting[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1996, 58(2 – 3): 189 – 200.
- [26] Kang Y H, Zheng C M. Mathematical modelling of chip thickness in micro-end-milling; a fourier modelling[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, 37(6): 4208 – 4223.
- [27] Yang C, G F, Wang G C. Prediction of cutting direction burr height in micromilling[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 684: 131 – 136.
- [28] Piquard R, D Acunto A, Laheurte P, et al. Micro-end milling of NiTi biomedical alloys, burr formation and phase transformation[J]. *Precision Engineering*, 2014, 38(2): 356 – 364.
- [29] Yadav A K, Bajpai V, Singh N K, et al. F-E modeling of burr size in high-speed micromilling of Ti6Al4V[J]. *Precision Engineering*, 2017, 49: 287 – 292.
- [30] Chen M J, Ni H B, Wang Z J, et al. Research on the modeling of burr formation process in micro-ball end milling operation on Ti-6Al-4V[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, 62(9 – 12): 901 – 912.
- [31] K Yang, Q S Bai, Yu Fuli, et al. Modelling and experimental analysis of the mechanism of micro burr formation in micro endmilling process[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering Nanotech Prec Eng*, 2010, 8(1): 75 – 83.
- 第一作者: 吴宇锋, 硕士研究生, 重庆大学机械工程学院, 400044 重庆市
- First Author: Wu Yufeng, Postgraduate, School of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China*